УДК: 656.224:656.223.18:004.942

А. И. Сафронов, канд. техн. наук

*Кафедра «Управление и защита информации»,
Российский университет транспорта, Москва*

Е. В. Лысенко

*Подразделение «Управление талантами»,
Российский университет транспорта, Москва*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНА ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА В УТРЕННИЙ ЧАС ПИК НА ЗАМКНУТОЙ БОЛЬШОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЛИНИИ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Выполнен анализ характеристик строящейся Большой кольцевой линии Московского метрополитена с точки зрения планирования перевозочного процесса. Проведено исследование характеристик всех действующих электродепо Московского метрополитена, оправдывающих планы строительства двух новых электродепо («Аминьевского» и «Нижегородского»), а также реконструкции одного из существующих электродепо («Замоскворецкого»), расположенных в городской черте Москвы – внутри кольцевой автомобильной дороги (МКАД), в окрестностях третьего транспортного кольца и за его пределами. Для нужд моделирования поперечно измерена протяженность замкнутой Большой кольцевой линии при условии передачи участка движения поездов от станции «Деловой Центр» до станции «Хорошёвская» перспективной Рублёво-Архангельской линии метрополитена. В соответствии с результатами проведенных измерений рассчитаны времена хода по перегонам замкнутой Большой кольцевой линии, позволившие впоследствии определить количество единиц электроподвижного состава, необходимых для обслуживания Большой кольцевой линии в утренний час пик.

График движения поездов; график оборота электроподвижного состава; автоматизация; планирование перевозочного процесса; метрополитен; моделирование; электродепо

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-584-616

Введение

Московский метрополитен, будучи комплексной транспортной системой, востребован среди пассажиров. При этом транспортное предприятие испытывает большие эксплуатационные нагрузки [1]. Планирование работы метрополитена требует тщательной подготовки как к перевозкам пассажиров, происходящим в течение дня, так и к ремонтам (диагностикам) путевой инфраструктуры, проводимым по завершении дневных перевозок.

Подготавливаемый план работы метрополитена, помимо учета технологических ограничений, должен обеспечивать комфортные пассажирские перевозки и не менее комфортные условия труда обслуживающего персонала. Упомянутым планом работы метрополитена, в частности, является плановый график движения (ПГД) пассажирских поездов метрополитена [2, 3].

ПГД — это основа технологии организации движения поездов по линии метрополитена. ПГД, составляемый для каждой линии, индивидуален. Разветвленность, протяженность и вид линии метрополитена в совокупности определяют уровень сложности составления ПГД [4].

Вопросу автоматизации составления ПГД пассажирских поездов метрополитена при использовании персонального компьютера уделяется немалое внимание начиная с последней четверти XX века [5, 6]. Развитием этих работ стал цикл, посвященный автоматизации составления графика оборота электроподвижного состава [7], являющегося неотъемлемой частью планирования перевозочного процесса.

В начале XXI века вычислительных мощностей персональных компьютеров оказалось достаточно для создания и внедрения в промышленную эксплуатацию автоматизированной системы для составления ПГД («АРМ Графиста») [8–13]. Внедрение «АРМ Графиста» позволило в деталях изучить технологический процесс планирования пассажирских перевозок по линиям метрополитена и принципы построения ПГД [14]. Тогда были найдены и апробированы рациональные методики автоматизации построения ПГД [15, 16], сформулированы критерии качества составления ПГД [4, 17].

Развитие новых информационных технологий [18–21] позволило:

- перейти к совершенствованию методов составления ПГД [22–25], а также графиков, технологически связанных с ним: графика оборота [26, 27] и графика работы локомотивных бригад [28–30];
- выстроить новые архитектуры автоматизации синтеза ПГД при использовании аппарата параллельных вычислений [31–34];
- расширить применение графовых методов решения задач планирования от классической логистической модели до построения графовых деревьев заполнения/освобождения точек ночной расстановки [35–38].

Существует проблема составления особых ПГД, например, для работы в праздничные дни, когда востребованность единиц электроподвижного состава на некоторых участках линий может заметно увеличиваться [39]. Есть риск не обеспечить стандартными ПГД должное обслуживание пассажиров в выходные либо понести убытки из-за неоправданного перерасхода ресурсов в будни [40, 41]. Необходимо помнить, что некоторые линии метрополитена в принципе имеют значительно больший пассажиропоток. Сценарии планирования перевозочного процесса на линиях с высокими значениями пассажиропотока существенно отличаются от классических сценариев планирования [39, 42].

Помимо удовлетворения ограничениям, накладываемым работой системы интервального регулирования, что, фактически, является аспектом безопасности движения поездов (важно не путать с информационной безопасностью на железнодорожном транспорте [43]), ПГД должен строиться таким образом, чтобы обеспечивать комфортные пассажироперевозки. Качественным ПГД при этом будет считаться тот, в который при прочих равных условиях заложен ресурс для восстановления движения поездов после возникновения сбойных ситуаций в процессе фактического движения поездов по линии метрополитена согласно составленному ПГД [44–54].

В условиях наличия на кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) обширной базы знаний и мощного алгоритмического аппарата, позволяющего проводить автоматизированное построение ПГД пассажирских поездов по Кольцевой линии, предпринята попытка качественной проверки устойчивости разработанных алгоритмов при работе с другой линией метрополитена, также обладающей кольцевой топологией.

Действующая Кольцевая линия Московского метрополитена сильно отличается от строящейся Большой кольцевой линии (БКЛ). Например, время полного оборота в час пик на Кольцевой линии составляет менее одного часа (27,5 мин.), а на БКЛ — значительно больше одного часа (1,5 ч.). Кольцевая линия обслуживается единицами электроподвижного состава (маршрутами) из одного физического электродепо, которое рассматривается на ПГД как две неразрывно связанные друг с другом части. Это сделано для четкого отслеживания диспетчером и составителями выходов/заходов маршрутов с конкретного главного пути линии. В общем случае движение по одному главному пути Кольцевой линии рассматривается как движение по радиальной линии, т. е. главные пути на Кольцевой линии большую часть времени движения поездов не зависят друг от друга. На БКЛ запланированы три электродепо, поэтому для нормальной работы с ними при использовании имеющегося программного обеспечения («АРМ Графиста») потребуются рассматривать отображения сразу шести электродепо, сведения о которых попарно неразрывны.

В настоящий момент движение поездов по участкам БКЛ фрагментировано. Большая часть БКЛ сегодня — это радиальная линия с «вилочной» организацией движения, оставшаяся часть функционирует в составе другой радиальной линии (временно).

1. Характеристики БКЛ, учитываемые при планировании перевозочного процесса

О строительстве БКЛ составители генерального плана развития города Москвы впервые задумались в середине XX века. Тогда генеральный план подвергался частым изменениям. В частности, эти изменения не раз сказывались

на трассировке БКЛ. Наиболее яркие примеры – повороты против часовой стрелки трасс Сокольнической, Замоскворецкой, Арбатско-Покровской и Калужско-Рижской линий на окраинах.

Первой с востока на север повернула трасса Арбатско-Покровской линии (соответствующие продления 1961 и 1963). После длительного следования на восток до наземной станции «Первомайская», реконструированной позже в электродепо «Измайлово», через новую наземную станцию «Измайловская» линия прошла сначала до новой, подземной «Первомайской», а позже к Щелковскому шоссе, где завершилась станцией «Щелковская». Станция «Щелковская» остается конечной станцией и в настоящее время, но уже утвержден проект продления Арбатско-Покровской линии до станции «Гольяново», расположенной северо-восточнее, ближе к Московской кольцевой автомобильной дороге [55].

Следующей направление с юго-восточного на восточное сменила Замоскворецкая линия (соответствующие продления 1985 и 2012). В конце XX века линия была продлена от станции «Орехово» до станции «Красногвардейская», долгое время являвшейся конечной. В начале XXI века состоялось продление линии до станции «Алма-Атинская». Станция возведена без оборотных тупиков. Это свидетельствует о том, что дальнейшее продление линии не предполагается.

В 1990 году на север (при следовании на северо-восток) за станцию «Черкизовская» и на юго-восток (при следовании на юго-запад) за станцию «Тёплый стан» состоялись продления со сменой направления Сокольнической и Калужско-Рижской линий соответственно. Анализируя эти действия градостроителей и метростроевцев сегодня, можно заключить, что они оказались преждевременными. Логично было не продлевать Калужско-Рижскую линию за станцию «Тёплый стан», а Сокольническую, напротив, продлить далее на северо-восток вдоль Щёлковского шоссе.

Трассировка большей части из упомянутых участков метрополитена наводит на мысль, что в 80-е годы XX века градостроители всерьез задумались о том, чтобы провести БКЛ вдоль МКАД, однако уменьшение финансовых вложений, выделяемых на строительство метрополитена, вызванное распадом СССР в 1990-е годы, заставило отказаться от возведения сложной и протяженной подземной железнодорожной трассы на окраинах города.

Новый утвержденный Генеральный план развития города Москвы, введенный в действие с момента присоединения юго-западных территорий Московской области, именуемых «Новой Москвой» [56], к территориям, расположенным внутри МКАД, включил в себя трассировку БКЛ, предложенную специалистами в 60-е годы XX века.

В связи с отмеченными выше обстоятельствами развитие современной БКЛ Московского метрополитена следует рассматривать, начиная с даты открытия пассажирского движения на участке «Автозаводская» – «Каховская» Замоскворецкой линии 11 августа 1969 года. Последующее продление Замоскворецкой

линии началось 30 декабря 1984 года, но не далее, на восток от станции «Каховская», а на юг, от станции «Каширская» до станции «Орехово», с организацией «вилочного» движения [39].

20 ноября 1995 года участок «вилочного» движения от станции «Каширская» до станции «Каховская» обособился в самостоятельную Каховскую линию, состоящую всего из трех станций. Новой линии присвоили на схеме Московского метрополитена номер 11 и бирюзовый цвет. Это сочетание параметров перенесено для обозначения действующего участка БКЛ, хотя, согласно хронологии развития событий, это не 11-я, а 14-я линия метрополитена. Строительство БКЛ началось в 2011 году на участке «Деловой центр» — «Нижняя Масловка». В тот период строящаяся линия называлась третьим пересадочным контуром (ТПК). При этом вторым пересадочным контуром является Кольцевая линия Московского метрополитена, а под первым пересадочным контуром понимают все станции пересадок, расположенные внутри Кольцевой линии.

26 февраля 2018 года для пассажиров открылся первый участок БКЛ — от станции «Деловой центр» до станции «Петровский парк». Данный участок движения пассажирских поездов был объединен «вилочным» движением с Солнцевской линией, на тот момент завершавшейся станцией «Раменки». Разветвление происходило по станции «Шелепиха». При движении по Солнцевской линии за станцией «Шелепиха» следовала станция «Парк Победы», при движении по БКЛ — «Деловой центр». Многие пассажиры не заметили, что для них открылась другая, новая станция «Деловой центр», относящаяся к БКЛ. Станция «Деловой центр», относящаяся к Солнцевской линии, была временно законсервирована для строительства оборотных тупиков.

С момента открытия БКЛ обслуживалась маршрутами электродепо «Измайлово» Арбатско-Покровской линии. Объединение с Солнцевской линией являлось стратегическим решением, технологически крайне необходимым, поскольку у БКЛ отсутствовало собственное электродепо. С продлением Солнцевского радиуса от станции «Раменки» до станции «Рассказовка» 20 августа 2018 года участок БКЛ стал обслуживаться маршрутами, приписанными к новому электродепо «Солнцево».

30 декабря 2018 года было запущено движение поездов до станции «Савёловская» («Нижняя Масловка» на протяжении всего времени строительства).

В 2019 году все три станции Каховской линии (обозначалась на схеме метрополитена после запуска движения по БКЛ номером 11 А) закрылись на реконструкцию.

27 марта 2020 года Некрасовская линия продлилась от станции «Косино» до станции «Лефортово». Фактически «Лефортово» и «Авиамоторная» — это станции БКЛ, работающие в составе продленной линии. При этом «Нижегородская» является кроссплатформенной станцией, на которой в настоящее время функционируют только главные пути, расположенные в центре станционного комплекса и относящиеся к Некрасовской линии, а крайние главные пути, от-

носящиеся к БКЛ, не задействованы. 31 декабря 2020 года Некрасовская линия получила продление до станции «Электrozаводская», однако и эта станция, согласно действующему проекту, относится к БКЛ.

Первая схема «вилочного» движения с разветвлением по станции «Шелепиха» действовала на БКЛ до 12 декабря 2020 года. На короткое время, с 12 по 21 декабря 2020 года, участок от станции «ЦСКА» до станции «Деловой центр» был закрыт для пассажиров. Поезда на участке «Савёловская» — «ЦСКА» двигались с увеличенными интервалами. 21 декабря для пассажиров открылись обе станции «Деловой центр». С этого момента Солнцевская линия и БКЛ с точки зрения пассажирского движения стали работать независимо. «Вилочного» движения на БКЛ с 21 декабря 2020 года по 1 апреля 2021 года не было. Поезда следовали от станции «Савёловская» до станции «Деловой центр» и обратно как по обычной радиальной линии.

1 апреля 2021 года «вилочное» движение вновь образовалось на БКЛ, но уже с разветвлением по станции «Хорошёвская». Часть составов продолжали следование от станции «Савёловская» до станции «Деловой центр» (для этого участка выделен второстепенный номер 11 А), другая часть — до станции «Мнёвники» (считается основным участком с номером 11).

После замыкания БКЛ планируется обособление «вилочного» движения от станции «Шелепиха» до станции «Хорошёвская» с внедрением второй камеры съездов. Этот шаг необходим для того, чтобы передать участок планируемой Рублёво-Архангельской линии.

Запуск замкнутой БКЛ должен произойти согласно плановым срокам строительства — в 2022 году.

Сегодня БКЛ — это крупнейший проект в мире в области метростроения. По протяженности БКЛ опередит 10-ю (кольцевую) линию Пекинского метрополитена, которая сейчас удерживает первое место в мире (57,9 км).

На рисунке 1 показана актуализированная схема БКЛ с выделением на ней синим цветом юго-восточного участка строительства, который, по прогнозам, откроется в последнюю очередь и замкнет линию в единый ТПК. Может сложиться так, что замыкание БКЛ случится на северо-востоке. В качестве плановых сроков для обоих участков указан 2022 год.

Северо-восточный участок БКЛ технологически более сложный, поскольку на нем есть две станции очень глубокого залегания. При этом его строительство началось намного раньше начала строительных работ на юго-восточном участке. На юго-восточном участке возводятся станции преимущественно неглубокого залегания, однако сооружение одного из тоннелей протяженностью почти 600 м, которое запланировано под Перервинским плёсом Москвы-реки, может занять более длительное время.

Предполагается, что движение по замкнутой Большой кольцевой линии в каждом направлении будет происходить с различным общим временем хода. Это означает, что маршруты внешнего круга с движением по городу против

Рис. 1. Схема БКЛ с обозначением юго-восточного участка строительства

часовой стрелки не будут заходить на участок, связанный с деловым центром «Москва-Сити», а маршруты внутреннего круга с движением по городу по часовой стрелке, напротив, будут. Сначала при движении со стороны станции «Народное ополчение» от станции «Хорошёвская» до «Делового центра», затем от «Делового центра» до станции «Хорошёвская» и последующим движением в сторону станции «ЦСКА».

Как составлять базу данных и строить ПГД в таких новых для Московского метрополитена условиях, пока не ясно, потому и моделирование в настоящей работе выполняется при условии, что участок «Деловой центр» – «Хорошёвская» уже считается переданным Рублёво-Архангельской линии. Движение поездов как по внешнему, так и по внутреннему кругу БКЛ в этом случае выполняется с одинаковым общим временем хода по линии.

БКЛ будут обслуживать три электродепо: «Нижегородское», «Замоскворецкое» и «Аминьевское».

«Нижегородское» – строящееся электродепо Московского метрополитена. Возводится на месте Московского завода по модернизации и строительству вагонов имени В. Е. Войтовича. Ввод электродепо в эксплуатацию запланирован на 2023 год, схема расположения на карте Москвы приведена на рисунке 2.

Рис. 2. Схема расположения и связей электродепо «Нижегородское» с главными путями Большой кольцевой линии

Рис. 3. Схема расположения и связей электродепо «Замоскворецкое» с главными путями Большой кольцевой линии

«Замоскворецкое» — существующее электродепо Московского метрополитена, обслуживавшее Замоскворецкую линию. Сейчас объект находится на стадии реконструкции путевого веера и готовится к приему достаточного количества единиц электроподвижного состава для обслуживания БКЛ. Схема расположения на карте Москвы приведена на рисунке 3.

«Аминьевское» — проектируемое электродепо Московского метрополитена, которое построят на западе Москвы. Под электродепо выделен участок площа-

Рис. 4. Схема расположения и связей электродепо «Аминьевское» с главными путями Большой кольцевой линии

дью 15,7306 га. Проект электродепо входит в программу реновации промзоны «Очаково», являясь ее неотъемлемой частью. Между электродепо «Аминьевское» и ближайшими станциями БКЛ предполагается строительство служебных соединительных ветвей. Электродепо будет размещаться западнее улицы Генерала Дорохова, между территорией ОАО «РТИ-Каучук» и Вереysкой улицей. Схема расположения на карте Москвы приведена на рисунке 4.

Накопление собранного обобщающего представления о трассировке БКЛ и о сложном пути ее развития со всеми сопутствующими изменениями способствовали более эффективному сбору исходных данных, необходимых для моделирования плана перевозочного процесса по этой линии.

2. Подготовка и ввод исходных данных, необходимых для автоматизированного построения «ниток» ПГД утреннего часа пик на БКЛ

Для построения ПГД вручную инженеры-графисты используют следующие наборы исходных данных [57].

- Времена хода по перегонам и стоянок на станциях в режимах часа пик и часа «непик»;
- заданная парность движения поездов на каждый час работы метрополитена, начиная с момента подачи напряжения на контактный рельс и завершая моментом снятия напряжения с контактного рельса [58];
- сведения о ремонтах, осмотрах, их длительностях, а также пунктах проведения ремонтно-диагностических мероприятий;
- информация о местах размещения на линии метрополитена точек ночной расстановки единиц электроподвижного состава и о количестве точек ночной расстановки на станциях и в окрестных перегонных тоннелях.

При автоматизированном построении ПГД необходима информация:

- о временах хода по перегонам и о стоянках на станциях в режимах часа пик и часа «непик»;
- о заданной парности движения поездов на каждый час работы метрополитена, в которые контактный рельс находится под напряжением;
- о ремонтах, осмотрах, их длительностях, а также пунктах проведения ремонтно-диагностических мероприятий;
- о точках ночной расстановки, последовательностях их заполнения и освобождения.

В общем случае для определения значений времен хода по перегонам решается задача энергоэффективного распределения общего времени хода по линии на времена хода по перегонам [41]. Задача решается по итогам проведения тяговых расчетов при известных параметрах профиля пути и накладываемых ограничениях скорости. Сведения о профиле пути могут быть получены только после того, как все перегонные тоннели пройдены всеми тоннелепроходческими механизированными комплексами.

К настоящему моменту не все тоннели БКЛ пройдены. При этом трасса БКЛ известна и опубликована в открытых источниках. Имеется возможность выполнить ориентировочный расчет с использованием классической формулы из физики, увязывающей скорость, время и расстояние [59]:

$$t_i = \frac{S_i}{v_{\text{cp}}}, \quad (1)$$

где t_i – время хода по i -му перегону; S_i – протяженность i -го перегона; v_{cp} – средняя скорость единиц электроподвижного состава по метрополитену.

На первом этапе сбора исходных данных выполнены измерения протяженностей перегонов БКЛ, оборотных тупиков, веток связи с электродепо при использовании веб-сервиса, созданного для работы со спутниковыми картами, содержащими разметку городских объектов. Сегодня в сети Интернет существует несколько подобных сервисов, но наиболее удобным для анализа объектов метрополитена является Wikimapia.

Измерения протяженностей перегонов выполнены при условии, что участок «Деловой центр» — «Хорошёвская» передан в состав другой линии и движение поездов по нему в рамках решаемой задачи не рассматривается. При этом условии набор учитываемых параметров БКЛ меняется на нижеследующий:

- единицы электроподвижного состава приписаны к трем электродепо;
- в составе контура БКЛ всего 29 станций, из них: 17 пересадочных на действующие линии метрополитена; две пересадочные на строящиеся линии метрополитена.

По итогам суммирования измеренных по спутниковой карте протяженностей перегонов определена общая протяженность замкнутой БКЛ. Она составила 60 561 м. Это, для сравнения, на 6000 м больше протяженности трассы Московского центрального кольца (МЦК).

При известной протяженности БКЛ по формуле (1) рассчитано время прохождения одним поездом полного круга (время полного оборота для линий с кольцевой топологией) при средних скоростях (по всему метрополитену) 40 км/ч, 50 км/ч, 60 км/ч.

Так, время полного оборота на БКЛ при средней скорости движения единиц электроподвижного состава 40 км/ч составляет 1:31:00, со средней скоростью движения единиц электроподвижного состава 50 км/ч — 1:12:45, со средней скоростью движения единиц электроподвижного состава 60 км/ч — 1:00:30.

В условиях, при которых невозможно получение точного набора исходных данных из открытых источников после проведения расчета указанного выше набора сведений, рационально остановиться на величине общего времени хода по линии, равной 1:14:45, т. е. на допущении, при котором во всех последующих расчетах используется усредненное значение времени хода по линии фиксированной протяженности. Точных данных о том, с какой средней скоростью будут следовать составы по БКЛ, в настоящем момент нет, но и неопределенность отсутствует благодаря наличию в Москве аналогичной действующей трассы с кольцевой топологией.

Оценивая опыт работы единиц электроподвижного состава на трассе МЦК, где интервалы движения поездов составляют 4 минуты, можно заметить, что время хода по линии составляет 1:28:00. На метрополитене интервалы движения поездов составляют 1,5–2 минуты. Согласно проведенным измерениям, БКЛ на 6 км больше МЦК, потому и время хода должно оказаться сопоставимо больше, чем 1:28:00, но незначительно. В связи с этим внутри имеющейся выборки данных по средним скоростям следует принять общее время хода по БКЛ равным 1:31:00, а среднюю скорость движения поездов по метрополитену равным соответственно 40 км/ч.

Помимо протяженностей перегонов БКЛ, выполнены и измерения протяженностей служебных соединительных ветвей (ССВ) между точками связи

перегонных тоннелей БКЛ с парковыми путями соответствующих электродепо БКЛ (табл. 1).

Руководствуясь терминологией, используемой инженерами-графистами и заложенной в систему «АРМ Графиста», в случае с электродепо «Замоскворецкое» и электродепо «Аминьевское» выход составов из депо и заход составов в депо планируется осуществлять через перегоны, расположенные между ближайшими к электродепо станциями. Протяженность ССВ рассчитана относительно этой точки перегона. Электродепо «Нижегородское» планируется связать не с перегоном, а с самой станцией, поэтому и расчет в этом случае выполнен от границы станции «Нижегородская».

В качестве опорной информации для составления бланка, предусматривающего построение ПГД поездов по БКЛ, используются сведения, взятые из базы данных Кольцевой линии Московского метрополитена. В перечне общих настроек ПГД этой базы данных, открытой в системе «АРМ Графиста», установлена максимальная высота рамки, в которую должен быть вписан ПГД при печати его на листе бумаги формата А0, величиной аналогичной той, которая выставлена для Замоскворецкой линии. Бланк для составления ПГД поездов по Замоскворецкой линии сегодня является наиболее информационно нагруженным. При использовании режима «Конструктор» в «АРМ Графиста» увеличено количество станций на линии, все они переименованы в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 1. Координаты станций вычислены пропорционально измеренным протяженностям перегонов и внесены в базу данных.

В полученной обновленной базе данных визуально проверена корректность следования перегонов строго друг за другом в каждом из направлений после изменений, произошедших в таблице «Задания» по итогам выполненных в «АРМ Графиста» манипуляций в режиме «Конструктор». Проверка показала, что таблица «Задания» при использовании алгоритмов конструирования, заложенных в «АРМ Графиста», составлена верно. В строках базы данных, соответствующих перегонам БКЛ, введены их протяженности, времена хода в режимах часа пик и часа «непик».

В связи с тем, что в настоящей работе интерес представляет режим утреннего часа пик, в базу данных для режима часа «непик» внесены те же самые времена

Таблица 1. Протяженности ССВ от особых точек перегонов, расположенных между ближайшими станциями связи с электродепо, а также от станции, непосредственно связанной с электродепо, до электродепо БКЛ

Станции связи с электродепо	Название электродепо	Расстояние, м
«Варшавская», «Каховская»	«Замоскворецкое»	1549
«Нижегородская»	«Нижегородское»	2818
«Аминьевская», «Давыдково»	«Аминьевское»	1449

хода, что и для часа пик. Важно отметить, что проведенный анализ исходных данных, необходимых для построения ПГД поездов по каждой линии Московского метрополитена, позволил выявить подмножество линий метрополитена, на которых движение поездов по перегонам в рабочие дни в режимах часа пик и часа «непик» осуществляется с одинаковыми временами хода. Отсюда следует, что идентичность времен хода для режимов часа пик и часа «непик» не является ошибочной и/или противоречивой информацией, и поэтому она может быть использована в модели планирования перевозочного процесса на БКЛ. Времена плановых стоянок по всем станциям БКЛ выставлены равными максимально допустимым значениям — 30 секунд.

После ввода в базу данных исходной информации о временах хода по перегонам и о стоянках на станциях появилась возможность использования «АРМ Графиста» для нужд дальнейшего развития модели планирования движения поездов по БКЛ в качестве системы автоматизированной коррекции введенных данных. Это возможно благодаря тому, что в «АРМ Графиста» интегрированы условия контроля реализуемости ПГД [60–62], позволяющие оперативно выявлять типовые ошибки в исходных данных и исправлять их.

Переход к следующему этапу работы — это начало моделирования: при известных исходных сведениях о временах хода по перегонам и стоянках на станциях появляется возможность определения ресурсов линии метрополитена, способствующих реализации желаемых показателей качества составления ПГД.

3. Автоматизированная коррекция введенных данных.

Предварительный этап имитационного моделирования в автоматизированной системе «АРМ Графиста»

Предварительный этап моделирования заключается в автоматизированной коррекции сведений, введенных в базу данных, а также в дополнении их связанной информацией. К настоящему моменту в базе данных содержатся сведения о временах хода по перегонам и стоянках на станциях. Далее необходимо определиться с заданной парностью движения поездов в утренний час пик.

После открытия бланка для построения ПГД пассажирских поездов по БКЛ, куда уже внесены все рассчитанные времена хода по перегонам и времена стоянок на станциях, можно воспользоваться инструментом «Окно размеров движения» для мониторинга потребных ресурсов, в частности для определения количества маршрутов, которые должны обслуживать линию в утренний час пик (рис. 5).

В инструмент «Окно размеров движения» заложены алгоритмы, использующие формулу (2), необходимую для расчета межпоездного интервала через известную величину заданной парности движения [63]:

$$J_i = \frac{3600}{N_i}, \quad (2)$$

где J_i – интервал движения поездов в i -м размере движения (одном часе работы метрополитена); N_i – парность движения поездов в i -м размере движения.

В данной работе составляется модель ПГД, а не ПГД-документ, подлежащий согласованию в службах метрополитена, поскольку реальные сведения о заданной парности движения поездов по БКЛ отсутствуют. Однако известно, что в утренний час пик желательно организовать движение поездов с минимальным интервалом попутного следования, равным 90 секунд. Таким образом, значение парности движения поездов в утренний час пик рассчитывается через заданную величину интервала (3) – решается обратная задача по отношению к формуле (2):

$$N_i = \frac{3600}{J_i}. \quad (3)$$

Окно размеров движения ×

Размер	Nз	Nф	J	Тпо	M	По I пути	По II пути	Всего	Пик
5 - 6	10	0	0:06:00	1:45:45	20	0	0	0	Нет
6 - 7	26	0	0:02:20	1:45:45	90	0	0	0	Нет
7 - 8	40	0	0:01:30	1:45:45	140	0	0	0	Да
8 - 9	40	0	0:01:30	1:45:45	140	0	0	0	Да
9 - 10	28	0	0:02:10	1:45:45	98	0	0	0	Нет
10 - 11	22	0	0:02:45	1:45:45	76	0	0	0	Нет
11 - 12	20	0	0:03:00	1:45:45	70	0	0	0	Нет
12 - 13	20	0	0:03:00	1:45:45	70	0	0	0	Нет
13 - 14	20	0	0:03:00	1:45:45	70	0	0	0	Нет
14 - 15	24	0	0:02:30	1:45:45	84	0	0	0	Нет
15 - 16	28	0	0:02:10	1:45:45	98	0	0	0	Нет
16 - 17	38	0	0:01:35	1:45:45	134	0	0	0	Нет
17 - 18	39	0	0:01:30	1:45:45	140	0	0	0	Да
18 - 19	35	0	0:01:45	1:45:45	120	0	0	0	Да
19 - 20	25	0	0:02:25	1:45:45	88	0	0	0	Нет
20 - 21	19	0	0:03:10	1:45:45	66	0	0	0	Нет
21 - 22	15	0	0:04:00	1:45:45	52	0	0	0	Нет
22 - 23	12	0	0:05:00	1:45:45	42	0	0	0	Нет
23 - 0	9	0	0:06:40	1:45:45	32	0	0	0	Нет
0 - 1	9	0	0:06:40	1:45:45	32	0	0	0	Нет
1 - 2	1	0	1:00:00	1:45:45	2	0	0	0	Нет

Сбросить | Сохранить

Рис. 5. Экранная форма «Окно размеров движения», позволяющая определить требуемое количество маршрутов (M), необходимых на линии в утренний час пик и в соседних процессах ПГД с учетом заданной парности/желаемого интервала попутного следования поездов

Инструмент «Окно размеров движения» подсказывает, что при введенных исходных параметрах, необходимых для достижения величины интервала попутного следования поездов, равной 90 секунд, и при рассчитанной парности движения величиной в 40 пар поездов, необходимо иметь в наличии 140 маршрутов.

К текущему моменту собраны и введены в базу данных уже две составляющие исходных сведений, необходимых для автоматизированного составления ПГД поездов по замкнутой БКЛ.

Можно перейти ко вводу в базу данных третьей составляющей — сведений о ремонтах, осмотрах, длительностях их проведения, а также местах проведения ремонтно-диагностических мероприятий.

Маршруты, как правило, осматриваются и ремонтируются в электродепо, к которым они приписаны. Отсюда следует, что необходимо организовать в базе данных связку электродепо со 140 единицами электроподвижного состава.

В работе проводится аналогия с Кольцевой линией Московского метрополитена при сборе данных, необходимых для автоматизированного составления ПГД поездов по замкнутой БКЛ. В процессе моделирования желаемое множество маршрутов перераспределяется между двумя частями одного физического электродепо. Фактически формулируется допущение о том, что на БКЛ работает одно электродепо (для рассмотрения в рамках модели выбрано электродепо «Нижегородское»).

Реальных ситуаций, когда одно электродепо содержит и обслуживает 140 единиц электроподвижного состава, не существует. Предполагается, что сформулированное условие, заложенное в модель перевозочного процесса по БКЛ, в дальнейшем позволит оценить рациональное соотношение между количеством маршрутов, которые должны отправляться на ночную расстановку в электродепо, и количеством маршрутов, расставляемых на ночь на линии.

Переход к рассмотрению сразу трех электродепо на БКЛ в рамках модели планируется лишь после того, как будет получен какой-либо результат построения ПГД с одним электродепо. Составление модели ПГД линии с кольцевой топологией, обслуживаемой сразу тремя электродепо, — революционный шаг для заложенных в «АРМ Графиста» алгоритмов автоматизированного построения ПГД. Ввод в существующую модель сразу трех электродепо будет серьезным возмущающим фактором, который в состоянии вывести систему «АРМ Графиста» из работоспособного состояния — нарушить устойчивость заложенных в нее алгоритмов.

Один то, что количество маршрутов на БКЛ впервые для Московского метрополитена превысит 100 единиц, заставило внести несколько изменений в код программного обеспечения, поскольку ранее во избежание влияния негативного человеческого фактора, связанного с ошибочным вводом пользователем номера маршрута, в «АРМ Графиста» была заложена защита от ввода оператором трехзначных номеров маршрутов. Попытки сделать это завершались запросом системы, обращенным к оператору, на повторный ввод номера маршрута. В но-

вой версии «АРМ Графиста» это ограничение упразднено и сформулировано иначе.

Покажем далее готовность к эволюционному развитию модели ПГД. Оправдаем градообразующее решение о том, что необходимо иметь в наличии именно три электродепо на линии (сооружение двух новых и реконструкция существующего). Определим, какое количество маршрутов (в пределе) может обслуживаться современным электродепо метрополитена. Интерес представляет и среднее значение маршрутов, приписанных к одному электродепо. Эти показатели могут быть получены в результате анализа ресурсов всех действующих электродепо Московского метрополитена (табл. 2).

В таблице 2 дополнительно введены следующие краткие обозначения: Σ — количество маршрутов, приписанных к электродепо; R — диапазон маршрутов, приписанных к электродепо; W — количество парковых путей в электродепо; * — показатели до закрытия электродепо; ** — электродепо рассчитано на 30 составов; *** — электродепо рассчитано на 47 составов; **** — электродепо рассчитано на 40 составов; ***** — электродепо рассчитано на 38 составов; ***** — электродепо рассчитано на 31 состав.

Анализ таблицы показывает, что среднее количество парковых путей в электродепо составляет 30, среднее количество приписанных к электродепо маршрутов — 38. Максимально известное количество парковых путей на метрополитене — 49, максимальное количество маршрутов, приписанных к одному электродепо, — 62.

Следует заметить, что электродепо «Варшавское» и электродепо «Замоскворецкое» расположены в одной технической зоне — между Варшавским шоссе и путями Павелецкого направления Московской железной дороги (МЖД), а расстояние между расположенными друг напротив друга торцами электродепо составляет не более 330 м. Это обстоятельство позволяет прогнозировать, что после реконструкции к электродепо «Замоскворецкое» можно будет приписать 62 маршрута. При этом получается, что между строящимися электродепо «Аминьевское» и «Нижегородское» должны распределиться 78 маршрутов. Если это распределение выполнить равномерно, то в каждом должно оказаться 39 маршрутов, что укладывается в рамки выявленного среднего значения принадлежности маршрутов одному электродепо метрополитена. Решение о строительстве двух новых электродепо и реконструкции одного существующего для нужд БКЛ оправданно. Двух электродепо для обслуживания линии такого масштаба недостаточно.

Далее показаны шаги моделирования ПГД поездов по замкнутой БКЛ с одним электродепо. На исполнение запускаются алгоритмы автоматизированного построения ПГД, заложенные в «АРМ Графиста». После выбора подготовленной для нужд моделирования базы данных открывается «Задатчик». «Задатчиком» в системе назван инструмент «Параметры автоматизированного построения ПГД».

Таблица 2. Ресурсы действующих электродепо Московского метрополитена

Код	Обслуживаемая линия	Название	Дата ввода в эксплуатацию	<i>W</i>	<i>R</i>	Σ
ТЧ-1	Сокольническая	«Северное»	26.04.1935	22	1–39	39
ТЧ-2	Замоскворецкая	«Сокол»	10.09.1938	25	41–80	40
ТЧ-3	Арбатско- Покровская	«Измайлово»	14.01.1950	28	1–33	33
ТЧ-4	Кольцевая	«Красная Пресня»	01.04.1954	28	1–36	36
ТЧ-5	Калужско-Рижская	«Калужское»	13.10.1962	49	38–78	41
ТЧ-6	Таганско- Краснопресненская	«Планерное»	28.12.1985	41	39–79	41
ТЧ-7	Каховская (КхЛ), Замоскворецкая (ЗЛ)	«Замоскво- рецкое»	10.07.1969– 10.04.2021	28*	1–40 (ЗЛ)* и 73–78* (КхЛ)	46*
ТЧ-8	Серпуховско- Тимирязевская (СТЛ), Бутовская (БЛ)	«Варшав- ское»	04.11.1983	29	1–45 (СТЛ) и 82–98 (БЛ)	62
ТЧ-9	Филёвская	«Фили»	01.01.1962	29	1–16, 18, 19, 51–55	23
ТЧ-10	Калужско-Рижская	«Свиблово»	30.09.1978	28	1–37	37
ТЧ-11	Таганско- Краснопресненская	«Выхино»	31.12.1966	36	1–38	38
ТЧ-12	Калининская	«Новогирее- во»	30.12.1979	23	1–32	32**
ТЧ-13	Сокольническая	«Черкизово»	24.06.1989	21	40–72	32
ТЧ-14	Серпуховско- Тимирязевская	«Владыки- но»	01.03.1991	39	39–81	42***
ТЧ-15	Люблинско- Дмитровская	«Печатники»	28.12.1995	39	1–35	35
ТЧ-16	Арбатско- Покровская	«Митино»	16.06.2015	30	40–81	42
ТЧ-17	Замоскворецкая	«Братеево»	15.01.2014	16	1–40	40
ТЧ-18	Солнцевская (СолЛ), Большая кольцевая (БКЛ)	«Солнцево»	30.08.2018	27	1–30 (СолЛ), 40–56 (БКЛ)	47****
ТЧ-19	Люблинско- Дмитровская	«Лихоборы»	11.06.2018	42	38–74	36*****
ТЧ-20	Некрасовская	«Руднёво»	03.06.2019	38	1–20	20*****

«Параметры автоматизированного построения ПГД» – это экранная форма, которая является панелью управления для внесения исходных данных, необходимых для нормальной работы алгоритмов автоматизированного построения ПГД. На этом этапе можно менять такие настройки, как тип ПГД, схема перебора вариантов при построении ПГД, схема построения одного варианта ПГД, установка режимов счетчиков без фактического построения реализуемых вариантов ПГД, тип ночной расстановки при выходе составов и заходе составов и др. (рис. 6).

«Задатчик» по умолчанию настроен на работу с линиями, обладающими кольцевой топологией, потому достаточно только нажатия на кнопку «Применить» на ранних этапах моделирования ПГД.

Параметры автоматизированного построения ПГД

Общие

1. Загрузить график оборота из БД? ☒

2. График на ☒ рабочие дни ☐ воскресные дни

3. Построение ☐ в прямом времени ☒ в обратном времени

4. Тип графика ☒ основной ☐ дополнительный ☐ вставка

Перебор вариантов

☐ Пропустить съём после утр. пика

☐ Пропустить ввод перед веч. пиком

Схема построения

☐ Пошаговая ☒ Вложенная

☐ Только первые

☐ Использовать значения по умолчанию

Значения для переходных процессов

Выход из ночной расстановки

Тип расстановки ☐ сложная ☒ нечётная ☐ чётная

☐ Закрепить начало нитки?

☒ Выводить первые поезда в прямом времени?

☐ Перебрать все варианты?

☐ Игнорировать расчёт н.р.?

Уход на ночную расстановку

Тип расстановки ☐ сложная ☒ нечётная ☐ чётная

☐ Перебрать все варианты?

☐ Игнорировать расчёт н.р.?

☐ Игнорировать перебор при ночной расстановке?

Перейти к варианту по вектору-коду

Остановиться не ранее реализации

Применить Отменить

Рис. 6. Экранная форма «Параметры автоматизированного построения ПГД», необходимая для ввода исходных данных перед запуском алгоритмов автоматизированного построения ПГД (для краткости именуемая «Задатчик»)

Параметры часа-пик

Время начала: 7:00:00

Количество составов на 1-ом пути: 70

Количество составов: 140

Количество составов на 2-ом пути: 70

☒ Начинаем построение с 1-го пути ☐ Начинаем построение со 2-го пути

Расчетный интервал 0:01:30 при парности 40

Начать построение Отмена

Рис. 7. Экранная форма для контроля и редактирования исходных данных, необходимых для построения «ниток» утреннего часа пик

Первым после обработки всех необходимых сведений и после контроля реализуемости появляется диалог ввода параметров утреннего часа пик. Работать с ним можно только если система нашла соответствие между количеством маршрутов, содержащихся во всех электродепо, и заданной парностью. Даже если диалог и отобразился с правильным количеством поездов, соответствующим заданной парности, процесс построения может не пойти далее и выдать побуждающее сообщение о том, что указанное количество поездов невозможно разместить на линии.

Таким образом, следует предварительно позаботиться о том, чтобы в базе данных были корректно заполнены такие поля, как «ёмкость» электродепо, а также указаны ёмкости точек ночной расстановки. Суммарная ёмкость объектов, участвующих в ночной расстановке, должна быть не меньше количества маршрутов, обслуживающих линию в час пик.

В том случае, когда все условия выполнены, для построения «ниток» утреннего часа пик необходимо подтвердить распределение потребного количества маршрутов по главным путям линии и нажать на кнопку «Применить» (рис. 7).

Об успешном построении «ниток» в режиме час пик возвестит побуждающее сообщение, вслед за которым откроется диалоговое окно для контроля и редактирования исходных данных, необходимых для программной обработки «ниток», нацеленной на организацию равномерного ввода составов из депо перед утренним часом пик. Моделирование этого процесса находится за рамками рассмотрения в настоящей публикации, потому нажимаем на кнопку «Отмена» — отказываемся от построения процесса. Отказ переведет сценарий выполнения алгоритма автоматизированного построения ПГД на этап форма-

тирования и визуализации полученного результата. Спустя некоторое время ожидания на бланке ПГД поездов по замкнутой БКЛ отобразятся построенные «нити» утреннего часа пик.

4. Результаты построения «ниток» утреннего часа пик на замкнутой Большой кольцевой линии Московского метрополитена

Рассмотрим результат автоматизированного построения «ниток» ПГД в утренний час пик. Ниже на рисунках 8 и 9 представлены фрагменты работы «АРМ Графиста». Рисунок 8 показывает, к чему сходится автоматизированное построение справа от утреннего часа пик, рисунок 9 демонстрирует левую границу ПГД (левее сместить полосу прокрутки уже невозможно).

Следует отметить, что первые попытки продвинуться дальше и продолжить автоматизированное составление ПГД поездов по замкнутой БКЛ равномерным вводом составов перед утренним часом пик показали, что при использовании преимущественно ресурсов одного электродепо переходный процесс завершается за 15 минут до завершения утреннего часа пик. Это недопустимый результат. Полученное означает, что час пик не обеспечен потребным количеством составов. Иными словами, не обеспечивается заданная парность движения поездов согласно размерам движения, соответствующим режиму часа пик.

Проведенный опыт дал отчетливое представление о том, что существенная часть нагрузки по организации ночной расстановки должна ложиться именно на станции и перегоны, а не на электродепо.

Важно отметить, что БКЛ запланирована и строится как полноценный пересадочный контур. Анализ схем станций, размещенных в открытых источниках, показал, что на линии строится большое количество станций, обладающих путевым развитием. Это хороший показатель для организации ночной расстановки. Он означает, что проблема организации ночной расстановки не осталась без внимания в процессе проектирования станционных комплексов и линии в целом.

Проведенное исследование и полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что имеющейся и создаваемой инфраструктуры БКЛ должно оказаться достаточно для размещения всех необходимых ресурсов с точки зрения организации перевозочного процесса.

Полученные результаты дают качественный рывок для дальнейшего исследования сложной линии метрополитена, обладающей кольцевой топологией и при этом с достаточно длительным временем полного оборота электроподвижного состава на ней. Составление полной модели ПГД поездов по БКЛ планируется к моменту составления ПГД-документа, утверждаемого Службами метрополитена. Существует мнение, что модель ПГД предоставит множество подсказок инженерам-графистам.

Рис. 8. «Нитки» режима часа пик на БКЛ, полученные в результате запуска алгоритмов автоматизированного построения ПГД

Рис. 9. По завершении построения «ниток» в режиме утреннего часа пик предыдущие «нитки» равномерно заполняют все размеры движения, предшествующие утреннему часу пик, обеспечивая реализуемость алгоритмов равномерного ввода составов на час пик

Заключение

В статье предложен способ моделирования ПГД пассажирских поездов по перспективным (строящимся) линиям метрополитена в условиях отсутствия четко сформулированных исходных данных, необходимых для запуска алгоритмов автоматизированного построения ПГД на примере Большой кольцевой линии, являющейся полноценным третьим пересадочным контуром. Изложенный способ моделирования позволяет при использовании разработанной на кафедре «Управление и защита информации» автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена («АРМ Графиста») аналитически определять рациональные значения входных параметров, необходимых для получения эффективных результатов работы системы. Контроль корректности ввода исходных данных становится элементом прогнозирования складывающейся ситуации на различных этапах моделирования и соответственно в процессе исполнения алгоритмов автоматизированного составления ПГД.

В ходе исследования планируемых ресурсов БКЛ проведено и детальное рассмотрение всех существующих электродепо всех действующих линий Московского метрополитена. Показано, что оправданным шагом является интеграция трех электродепо в структуру Москвы для обслуживания БКЛ, при том, что большинство действующих линий Московского метрополитена обслуживается не более чем двумя электродепо.

В работе экспериментально, с использованием действующего программного обеспечения «АРМ Графиста», показано, как поэтапно запускать автоматизированное построение процесса часа пик с учетом ограничений, установленных в системе для контроля реализуемости и реализации, и как перейти к анализу результата и данных, необходимых для построения последующих процессов ПГД, таких как автоматизированный равномерный ввод составов перед утренним часом пик.

Полученные результаты моделирования ПГД могут быть полезны инженерам-графистам, которые в 2022 году приступят к построению нормативных документов, регламентирующих план перевозочного процесса по БКЛ, при использовании в качестве исходных данных значений заданной парности движения поездов, выданных городом в качестве задания на построение эффективного ПГД.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001 (заявка 2020 года): «Разработка моделей и методов оптимизации производственных ресурсов городских рельсовых транспортных систем (ГРТС) на основе технологии больших данных (*bigdata*)».

Библиографический список

1. Московский метрополитен [Электронный ресурс]: Метрополитен в цифрах. – URL: <https://www.mosmetro.ru/press/digits/> (дата обращения: 28.05.2021).
2. *Пронин В. А.* Организация работы станций на Московском метрополитене: методические указания / В. А. Пронин. – М.: Транспорт, 1975. – 72 с.
3. *Бакулин А. С.* Организация движения поездов и работа станций метрополитена: учебник для подготовки рабочих на производстве / А. С. Бакулин, В. А. Пронин, Е. А. Фёдоров, К. И. Кудринская. – М.: Транспорт, 1981. – 230 с.
4. *Сафронов А. И.* Методика автоматизированного построения планового графика движения поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Мир Транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 3 (36). – С. 98–105.
5. *Астрахан В. И.* Алгоритмизация процесса составления графика движения поездов метрополитена / В. И. Астрахан, А. И. Жербина // Труды МИИТа. – М.: МИИТ, 1975. – № 492. – С. 99–105.
6. *Баранов Л. А.* Построение на ЭВМ графика движения поездов метрополитена / Л. А. Баранов, А. И. Жербина // Вестник ВНИИЖТа. – М.: ВНИИЖТ, 1981. – № 2. – С. 17–20.
7. *Феофилов А. Н.* Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена / А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 7. – С. 10–13.
8. *Сидоренко В. Г.* Автоматизация построения планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 2. – С. 6–10.
9. *Christian S.* Railway scheduling problems and their decomposition / S. Christian // Osnabruck. – 2007. – 123 p.
10. *Bruker P.* Scheduling Algorithms / P. Bruker. – Leipzig: Springer, 2007. – 371 p.
11. *Zhao J.* A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components / J. Zhao, A. H. C. Chan, M. P. N. Burrow // Rail Rapid Transit. – 2009. – № 223. – Pp. 533–541.
12. *Mišauskaitė I.* Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule in Automatizavimas, Robototechnika / I. Mišauskaitė, V. Bagdonas // Electronic and electrical engineering. – 2006. – Vol. 125. – № 7 (71). – Pp. 43–46.
13. *Shahrzad M. P.* Towards Signalling Maintenance Scheduling for European Railway Traffic Management System / M. P. Shahrzad, M. R. Kourosh // DTU Management Engineering. – 2017. – 223 p.
14. *Сафронов А. И.* Классификационный анализ мероприятий в рамках сопровождения автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена и аналогичных систем / А. И. Сафронов, М. А. Чжо // X Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере» (ITI*2019): тезисы докладов, Минск, 23–24 мая 2019 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2019. – 270 с. – ISBN 978-985-7198-01-6.
15. *Сеславин А. И.* Градиентный способ централизованного управления городскими транспортными системами / А. И. Сеславин, Л. Н. Воробьева // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 2. – С. 71–73.
16. *Сидоренко В. Г.* Методы выравнивания интервалов движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, Е. Ю. Рындина // ВЕСТНИК МИИТа. – 2008. – Вып. 18. – С. 8–10.
17. *Сафронов А. И.* Автоматизированное построение планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Вестник РГУПС. – 2012. – № 3. – С. 99–104.

18. *Сидоренко В. Г.* Применение современных технологий программирования к автоматизации планирования движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафонов, К. М. Филипченко, М. А. Чжо // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 331–347.
19. *Almaalei N. N. H.* Review of ACO algorithm on network and scheduling problem / N. N. H. Almaalei, S. N. A. M. Razali // Compusoft. – 2019. – Vol. 8. – № 7. – Pp. 3250–3260.
20. *Trivedi P.* Componentry analysis of intelligent transportation systems in smart cities towards a connected future / P. Trivedi, F. Zulkernine // 22nd IEEE International conference on high performance computing and communications, 18th IEEE International conference on smart city and 6th IEEE International conference on data science and systems, HPCC-SMARTCITY-DSS 2020. – 2020. – Pp. 1073–1079.
21. *Yang M.* The sustainable development of modern railway transportation planning and management under the guidance of COM technology / M. Yang, A. Long // 7th International symposium on innovation and sustainability of modern railway, ISMR 2020. – 2020. – Pp. 336–348.
22. *Boroun M.* An efficient heuristic method for joint optimization of train scheduling and stop planning on double-track railway systems / M. Boroun, S. Ramezani, N. V. Farahani, E. Hassannayebi, S. Abolmaali, M. Shakibayifar // INFOR: Information Systems and Operational Research. – 2020. – Vol. 58. – № 4. – Pp. 652–679.
23. *Kim H. J.* Determination of necessary subsidiary track according to train operation frequency in a heterogeneous train pattern / H. J. Kim // APPLIED SCIENCES (SWITZERLAND). – 2020. – Vol. 10. – № 12. – Pp. 41–46.
24. *Shakibaei S.* A multi-objective optimisation model for train scheduling in an open-access railway market / S. Shakibaei, P. Alpkokin, J. A. Black // Transportation planning and technology. – 2021. – Vol. 44. – № 2. – Pp. 176–193.
25. *Dalapati P.* Optimal scheduling for delay management in railway network using hybrid bat algorithm / P. Dalapati, K. Paul // Lecture notes in electrical engineering. – 2021. – Vol. 702. – Pp. 91–103.
26. *Long X.* Optimum multi-level maintenance scheduling model for metro vehicles with delay time theory / X. Long, G. Liu, S. Chen, H. Peng, S. Liu // Tiedao xuebao. – 2021. – Vol. 43. – № 2. – Pp. 30–36.
27. *Cavalcante C. A. V.* Inspection and replacement policy with a fixed periodic schedule / C. A. V. Cavalcante, R. S. Lopes, P. A. Scarf // Reliability engineering & system safety. – 2021. – Vol. 208. – DOI:10.1016/j.ress.2020.107402.
28. *Маркевич А. В.* Автоматизация управления распределением трудовых ресурсов с использованием генетического алгоритма / А. В. Маркевич, В. Г. Сидоренко // Информатизация образования и науки. – 2019. – № 3 (43). – С. 36–49.
29. *Heil, J.* Railway crew scheduling: models, methods and applications / J. Heil, K. Hoffmann, U. Buscher // European journal of operational research. – 2020. – Vol. 283. – № 2. – Pp. 405–425.
30. *Wolniewicz Ł.* Evaluation of train crews schedule in terms of robustness / Ł. Wolniewicz // Journal of konbin. – 2019. – Vol. 49. – № 1. – Pp. 69–94.
31. *Сидоренко В. Г.* Применение параллельных вычислений при планировании логистических процессов / В. Г. Сидоренко, А. С. Петров // Информатизация образования и науки. – 2018. – № 2 (38). – С. 51–61.
32. *Passchyn W.* Scheduling parallel batching machines in a sequence / W. Passchyn, F. C. R. Spieksma // Journal of scheduling. – 2019. – Vol. 22. – № 3. – Pp. 335–357.
33. *Wu Q.* Parallel computing in railway research / Q. Wu, M. Spiryagin, C. Cole, T. McSweeney // International journal of rail transportation. – 2020. – Vol. 8. – № 2. – Pp. 111–134.

34. *Akhmetov B.* Algorithm of parallel data processing in the automated dispatcherization system of railway transport movement / B. Akhmetov, G. Yerkeldessova, T. Sarzhanov, G. Mus-sayeva, V. Lakhno // Journal of theoretical and applied information technology. – 2019. – Vol. 97. – № 9. – Pp. 2491–2502.
35. *Сидоренко В. Г.* Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов/В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко // Информатизация образования и науки. – 2015. – № 4 (28). – С. 123–132.
36. *Сидоренко В. Г.* Применение генетических алгоритмов к решению задачи планирования работы электроподвижного состава метрополитена/В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 13–16.
37. *Kyaw M. A.* The Application of Genetic Algorithms for the Scheduling of Electric Rolling Stock Maintenance/М. А. Kyaw, V. G. Sidorenko, A. I. Safronov, V. G. Buchirin // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2019. – Pp. 2148–2151.
38. *Сидоренко В. Г.* Архитектура многопоточного программного продукта, реализующего планирование логистических процессов/В. Г. Сидоренко, А. С. Петров // Информатизация образования и науки. – 2020. – № 1 (45). – С. 25–38.
39. *Сидоренко В. Г.* Синтез планового графика движения зонного типа/В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова // Мир транспорта. – 2010. – № 4. – С. 128–134.
40. *Hu H.* A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving/Н. Hu, K. Li, X. Xu // Journal of Modern Transportation. – 2013. – № 21. – С. 9–16.
41. *Baranov L. A.* Energy-optimal control of vehicle traffic/L. A. Baranov, V. M. Maksimov, N. A. Kuznetsov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – vol. 87. – № 9. – pp 498–504.
42. *Искаков Т. А.* Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена // Т. А. Искаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Автоматика на транспорте. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 38–63.
43. *Wu Z.* Calculating vulnerability index of urban metro systems based on satisfied route/Z. Wu, J. Sun, R. Xu // Physica A: statistical mechanics and its applications. – 2019. – Vol. 531. – DOI:10.1016/j.physa.2019.121722.
44. *Palte M. H. A.* Smartfleet, how «smart» rail vehicles help improve business/M. H. A. Palte // 5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011). – 2011. – Pp. 1–4.
45. *Noah J. G.* Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes/J. G. Noah // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2014. – № 2424. – Pp. 58–65.
46. *Forsgren M.* Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making / M. Forsgren, M. Aronsson, S. Gestrelus, H. Dahlberg // Computers in Railways XIII: Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems: WIT Press. – 2012. – Pp. 439–450.
47. *Баранов Л. А.* Обеспечение безопасности движения поездов в беспилотных транспортных системах/Л. А. Баранов // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления. – 2019. – С. 1995–1999.
48. *Баранов Л. А.* Централизованное управление движением поездов городских железных дорог современного мегаполиса/Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, С. Е. Иконников, Д. А. Антонов // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 1. – С. 30–38.
49. *Баранов Л. А.* Методы повышения безопасности движения поездов городских железных дорог в условиях централизованного автоматического управления/Л. А. Баранов,

- Е. П. Балакина // Материалы XXVIII международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Под общей редакцией А. О. Калашникова, В. В. Кульбы. – 2020. – С. 297–302.
50. *Baranov L. A.* The disturbances prediction in the systems of automatic train traffic control of urban transport systems/L. A. Baranov, E. P. Balakina, A. I. Godyaev // International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon. – 2020. – Pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271390.
51. *Баранов Л. А.* Беспилотные транспортные средства городского железнодорожного транспорта: управление и обеспечение безопасности движения/Л. А. Баранов, С. Е. Иконников // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы техносферной безопасности». – 2019. – С. 39–41.
52. *Баранов Л. А.* Беспилотная система управления движением поездов как составляющая цифровизации городского транспорта/Л. А. Баранов // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 441–449.
53. *Баранов Л. А.* Интеграционный подход в обучении оперативных работников городских рельсовых транспортных систем/Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 2. – С. 22–31.
54. *Баранов Л. А.* Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения/Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова // Надёжность. – 2021. – Т. 21. – № 2. – С. 17–23.
55. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. [Электронный ресурс]: Гольяново URL: [https:// stroi.mos.ru/metro/station/97](https://stroj.mos.ru/metro/station/97) (дата обращения: 06.07.2021).
56. Старые карты городов России и зарубежья. [Электронный ресурс]: Как изменялись границы Москвы URL: [http:// retromap.ru/forum/viewtopic.php?p=255](http://retromap.ru/forum/viewtopic.php?p=255) (дата обращения: 06.07.2021).
57. *Минаев Г. И.* Правила технической эксплуатации метрополитенов РФ/Г. И. Минаев, С. Б. Сухов, А. Г. Фёдоров, М. В. Фурсаев, С. Н. Мизгиев. – М.: ЗАО Издательский центр ТА Инжиниринг. – 2003. – 109 с.
58. *Sauder R. L.* Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization / R. L. Sauder, W. M. Westerman // Interfaces. – 1983. – Vol. 6. – № 13. – Pp. 24–37.
59. *Дробышев Ю. А.* Олимпиады по математике/Ю. А. Дробышев // М.: Экзамен. – 2021. – 144 с. ISBN 5–377–15817–2.
60. *Межох А. К.* Вопросы анализа реализуемости заданного графика движения поездов метрополитена/А. К. Межох // Тр. МИИТа. – 1977. – Вып. 550. – С. 54–57.
61. *Сафронов А. И.* Условия реализации и реализуемости при автоматизированном построении планового графика движения пассажирских поездов метрополитена/А. И. Сафронов // Неделя науки-2011. Наука транспорту: труды научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. III–157–III–158.
62. *Сафронов А. И.* Сценарное пространство построения планового графика движения поездов метрополитена/А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 1. – С. 51–56.
63. *D’Acierno L.* Defining Reserve Times for Metro Systems: An Analytical Approach/L. D’Acierno, M. Botte, M. Gallo, B. Montella // Journal of Advanced Transportation. – 2018. – Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2018/5983250.

A. I. Safronov

*Department of Management and Information Protection,
Russian University of Transport, Moscow*

E. V. Lysenko

*Talent management,
Russian University of Transport, Moscow*

MODELING THE PLAN OF THE TRANSPORTATION PROCESS DURING THE MORNING RUSH HOUR ON THE CLOSED BOLSHAYA KOLTSEVAYA LINE OF THE MOSCOW METRO

The article analyzes the characteristics of the construction of the Bolshaya Koltsevaya line (Large Circle Line) of the Moscow Metro from the point of view of the transportation process planning. The authors have studied the characteristics of all operating depots of the Moscow Metro that justify the plans for the construction of two new depots (Aminievsky and Nizhegorodsky), as well as the reconstruction of one of the existing depots (Zamoskvoretsky), located within the city limits of Moscow – inside the Moscow Automobile Ring Road (MKAD), in the vicinity of the Third Transport Ring and beyond. For the needs of modeling, the station-to-station length of the closed Bolshaya Koltsevaya line was measured, subject to the transfer of a train traffic section from the Delovoy Tsentr station to the Khoroshevskaya station of the projected Rublyovo-Arkhangelskaya metro line. Based on the measurement findings, the station-to-station travel times along the closed Bolshaya Koltsevaya line were calculated, which subsequently made it possible to determine the number of electric rolling stock units required to service the Bolshaya Koltsevaya line in the morning rush hour.

Train timetable; electric rolling stock turnover schedule; automation; transportation process scheduling; subway; modeling; electric depot

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-584-616

References

1. Moskovskiy metropoliten [Moscow Metro] [Electronic resource]: Metropoliten v tsifrakh [Metro Figures] URL: <https://www.mosmetro.ru/press/digits/> (Accessed: May 28, 2021).
2. *Pronin V.A.* Organizatsiya raboty stantsiy na Moskovskom metropolitene: metodicheskiye ukazaniya [Organization of Moscow Metro Stations Operation: Guidelines]. Moscow, Transport Publ., 1975, 72 p. (In Russian)
3. *Bakulin A.S., Pronin V.A., Fyodorov E.A. & Kudrinskaya K.I.* (1981) Organizatsiya dvizheniya poyezdov i rabota stantsiy metropolitena [Organization of train traffic and work of metro stations]. Uchebnik dlya podgotovki rabochikh na proizvodstve [Textbook for training workmen]. Moscow, Transport Publ., 230 p. (In Russian)
4. *Safronov A.I. & Sidorenko V.G.* (2011) Metodika avtomatizirovannogo postroyeniya planovogo grafika dvizheniya poyezdov metropolitena [Methods of automated subway train traffic scheduling]. Mir transporta [World of Transport and Transportation], vol. 9, no. 3 (36), pp. 98–105. (In Russian)
5. *Astrakhan V.I. & Zherbina A.I.* (1975) Algoritmizatsiya protsessa sostavleniya grafika dvizheniya poyezdov metropolitena [Algorithm development of scheduling the movement of subway trains]. Proceedings of MIIT, Moscow, MIIT, no. 492, pp. 99–105. (In Russian)

6. *Baranov L. A. & Zherbina A. I. (1981) Postroyeniye na EVM grafika dvizheniya poyezdov metropolitena* [Computer-based subway train traffic scheduling]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the Railway Research Institute], Moscow, VNIIZhT, no. 2, pp. 17–20. (In Russian)
7. *Feofilov A. N. (1991) Matematicheskaya model' sostavleniya grafikov dvizheniya poyezdov na liniyakh metropolitena* [Mathematical model for subway lines train traffic scheduling]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of the Railway Research Institute], no. 7, pp. 10–13. (In Russian)
8. *Sidorenko V. G. (2003) Avtomatizatsiya postroyeniya planovogo grafika dvizheniya poyezdov metropolitena* [Automation of planned subway train traffic scheduling]. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii* [Automation and Modern Technologies], no. 2, pp. 6–10. (In Russian)
9. *Christian S. (2007) Railway scheduling problems and their decomposition*/S. Christian//Osnabruck, 123 p.
10. *Bruker P. (2007) Scheduling Algorithms*/P. Bruker//Leipzig: Springer. 371 p.
11. *Zhao J. (2009) A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components* / J. Zhao, A. H. C. Chan, M. P. N. Burrow//Rail Rapid Transit, no. 223, pp. 533–541.
12. *Mišauskaitė I. (2006) Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule in Automatizavimas, Robototechnika*/I. Mišauskaitė, V. Bagdonas//Electronic and electrical engineering, vol. 125, no. 7 (71), pp. 43–46.
13. *Shahzad M. P. (2017) Towards Signalling Maintenance Scheduling for European Railway Traffic Management System*/M. P. Shahzad M. R. Kourosh//DTU Management Engineering, 223 p.
14. *Safronov A. I. & Zhuo A. (2019) Klassifikatsionnyy analiz meropriyatiy v ramkakh soprovozhdeniya avtomatizirovannoy sistemy postroyeniya planovykh grafikov dvizheniya passazhirskikh poyezdov metropolitena i analogichnykh sistem* [Classification analysis of activities within the framework of the maintenance of an automated passenger subway train traffic scheduling system and similar systems]. *X Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Informatsionnyye tekhnologii v promyshlennosti, logistike i sotsial'noy sfere» (ITI*2019): tezisy dokladov* [X International Scientific and Technical Conference “Information Technologies in Industry, Logistics and Social Sphere” (ITI*2019): Abstracts], Minsk, May 23–24, 2019. Minsk, UIIP NAS Belarus, pp. 181–183. (In Russian) ISBN 978–985–7198–01–6.
15. *Seslavin A. I. & Vorob'eva L. N. (2005) Gradiyentnyy sposob tsentralizovannogo upravleniya gorodskimi transportnymi sistemami* [Gradient method of centralized management of urban transport systems]. *Science and Technology in Transport*, no. 2, pp. 71–73. (In Russian)
16. *Sidorenko V. G. & Ryndina E. Yu. (2008) Metody vyravnivaniya intervalov dvizheniya poyezdov metropolitena* [Methods of alignment of subway train movement intervals]. *Bulletin of MIIT*, iss. 18, pp. 8–10. (In Russian)
17. *Safronov A. I. & Sidorenko V. G. (2012) Avtomatizirovannoye postroyeniye planovogo grafika dvizheniya passazhirskikh poyezdov metropolitena* [Automated passenger subway train traffic scheduling]. *Bulletin of RSTU*, no. 3, pp. 99–104. (In Russian)
18. *Sidorenko V. G., Safronov A. I., Filipchenko K. M. & Zhuo M. A. (2016) Primeneniye sovremennykh tekhnologiy programmirovaniya k avtomatizatsii planirovaniya dvizheniya poyezdov metropolitena* [Application of modern programming technologies to the automation of subway train traffic scheduling]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 2, no. 3, pp. 331–347. (In Russian)
19. *Almaalei N. N. H. (2019) Review of ACO algorithm on network and scheduling problem*/N. N. H. Almaalei, S. N. A. M. Razali//Compusoft, vol. 8. no. 7, pp. 3250–3260.
20. *Trivedi P. (2020) Componentry analysis of intelligent transportation systems in smart cities towards a connected future*/P. Trivedi, F. Zulkernine//22nd IEEE International conference on high

- performance computing and communications, 18th IEEE International conference on smart city and 6th IEEE International conference on data science and systems, HPCC-SMARTCITY-DSS 2020, pp. 1073–1079.
21. Yang M. (2020) The sustainable development of modern railway transportation planning and management under the guidance of COM technology/M. Yang, A. Long//7th International symposium on innovation and sustainability of modern railway, ISMR 2020, pp. 336–348.
 22. Boroun M. (2020) An efficient heuristic method for joint optimization of train scheduling and stop planning on double-track railway systems/M. Boroun, S. Ramezani, N. V. Farahani, E. Hassan-nayebi, S. Abolmaali, M. Shakibayifar//INFOR: Information Systems and Operational Research, vol. 58, no. 4, pp. 652–679.
 23. Kim H. J. (2020) Determination of necessary subsidiary track according to train operation frequency in a heterogeneous train pattern/H. J. Kim//APPLIED SCIENCES (SWITZERLAND), vol. 10, no. 12, pp. 41–46.
 24. Shakibaei S. (2021) A multi-objective optimisation model for train scheduling in an open-access railway market/S. Shakibaei, P. Alpkokin, J. A. Black//Transportation planning and technology, vol. 44, no. 2, pp. 176–193.
 25. Dalapati P. (2021) Optimal scheduling for delay management in railway network using hybrid bat algorithm/P. Dalapati, K. Paul//Lecture notes in electrical engineering, vol. 702, pp. 91–103.
 26. Long X. (2021) Optimum multi-level maintenance scheduling model for metro vehicles with delay time theory/X. Long, G. Liu, S. Chen, H. Peng, S. Liu//Tiedao xuebao, vol. 43, no. 2, pp. 30–36.
 27. Cavalcante C. A. V. (2021) Inspection and replacement policy with a fixed periodic schedule/C. A. V. Cavalcante, R. S. Lopes, P. A. Scarf//Reliability engineering & system safety, vol. 208. DOI:10.1016/j.res.2020.107402.
 28. Markevich A. V. & Sidorenko V. G. (2019) Avtomatizatsiya upravleniya raspredeleniyem trudovykh resursov s ispol'zovaniyem geneticheskogo algoritma [Labor allocation management automation using a genetic algorithm]. Informatizatsiya obrazovaniya i nauki [Informatization of Education and Science Journal], no. 3 (43), pp. 36–49. (In Russian)
 29. Heil J. Railway crew scheduling: models, methods and applications/J. Heil, K. Hoffmann, U. Buscher//European journal of operational research, 2020, vol. 283, no. 2, pp. 405–425.
 30. Wolniewicz Ł. (2019) Evaluation of train crews schedule in terms of robustness/Ł. Wolniewicz//Journal of konbin, vol. 49, no. 1, pp. 69–94.
 31. Sidorenko V. G. & Petrov A. S. (2018) Primeneniye parallel'nykh vychisleniy pri planirovanii logisticheskikh protsessov [Application of parallel computing in planning logistic processes]. Informatizatsiya obrazovaniya i nauki [Informatization of Education and Science Journal], no. 2 (38), pp. 51–61. (In Russian)
 32. Passchyn W. (2019) Scheduling parallel batching machines in a sequence/W. Passchyn, F. C. R. Spieksma//Journal of scheduling, vol. 22, no. 3, pp. 335–357.
 33. Wu Q. Parallel computing in railway research/Q. Wu, M. Spiriyagin, C. Cole, T. McSweeney//International journal of rail transportation, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 111–134.
 34. Akhmetov B. (2019) Algorithm of parallel data processing in the automated dispatcherization system of railway transport movement/B. Akhmetov, G. Yerkeldessova, T. Sarzhanov, G. Mus-sayeva, V. Lakhno//Journal of theoretical and applied information technology, vol. 97, no. 9, pp. 2491–2502.
 35. Sidorenko V. G. & Filipchenko K. M. (2015) Metod effektivnogo planirovaniya obsluzhivaniya s primeneniym teorii grafov [Efficient maintenance scheduling method using graph theory]. Informatizatsiya obrazovaniya i nauki [Informatization of Education and Science Journal], no. 4 (28), pp. 123–132. (In Russian)

36. *Sidorenko V. G. & Zhuo A.* (2016) *Primeneniye geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadachi planirovaniya raboty elektropodvizhnogo sostava metropolitena* [Application of genetic algorithms to solving the problem of operation planning of the subway electric rolling stock]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], no. 6, pp. 13–16. (In Russian)
37. *Kyaw M. A.* (2019) *The Application of Genetic Algorithms for the Scheduling of Electric Rolling Stock Maintenance*/M. A. Kyaw, V. G. Sidorenko, A. I. Safronov, V. G. Buchirin//IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), pp. 2148–2151.
38. *Sidorenko V. G. & Petrov A. S.* (2020) *Arkhitektura mnogopotochnogo programmnoy produkta, realizuyushchego planirovaniye logisticheskikh protsessov* [The architecture of a multithreaded software that implements the planning of logistics processes]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of Education and Science Journal], no. 1 (45), pp. 25–38. (In Russian)
39. *Sidorenko V. G. & Novikova M. V.* (2010) *Sintez planovogo grafika dvizheniya zonnogo tipa* [Synthesis of the planned zonal traffic schedule]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation], no. 4, pp. 128–134. (In Russian)
40. *Hu H.* (2013) *A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving*/H. Hu, K. Li, X. Xu//*Journal of Modern Transportation*, no. 21, pp. 9–16. (In Russian)
41. *Baranov L. A.* (2016) *Energy-optimal control of vehicle traffic*/L. A. Baranov, V. M. Maksimov, N. A. Kuznetsov//*Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 9, pp. 498–504.
42. *Iskakov T. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G. & Zhuo M. A.* (2020) *Podkhody k otsenke kachestva planirovaniya i upravleniya dvizheniyem passazhirskikh poyezdov metropolitena* [Approaches to assessing the quality of planning and controlling the subway passenger train traffic]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 6, no. 1, pp. 38–63. (In Russian)
43. *Wu Z.* (2019) *Calculating vulnerability index of urban metro systems based on satisfied route*/Z. Wu, J. Sun, R. Xu//*Physica A: statistical mechanics and its applications*, vol. 531. DOI:10.1016/j.physa.2019.121722.
44. *Palte M. H. A.* (2011) *Smartfleet, how «smart» rail vehicles help improve business*/M. H. A. Palte//5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011), pp. 1–4.
45. *Noah J. G.* (2014) *Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes*/J. G. Noah//*Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2424, pp. 58–65.
46. *Forsgren M.* (2012) *Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making*/M. Forsgren, M. Aronsson, S. Gestrelus, H. Dahlberg//*Computers in Railways XIII: Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems*: WIT Press, pp. 439–450.
47. *Baranov L. A.* (2019) *Obespecheniye bezopasnosti dvizheniya poyezdov v bespilotnykh transportnykh sistemakh* [Ensuring the train traffic safety in unmanned transport systems]. *Sbornik trudov XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya* [Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on Management Problems], pp. 1995–1999. (In Russian)
48. *Baranov L. A., Balakina E. P., Ikonnikov S. E. & Antonov D. A.* 2020, *Tsentralizovannoye upravleniye dvizheniyem poyezdov gorodskikh zheleznnykh dorog sovremennogo megapolisa* [Centralized traffic control of urban railways in a modern metropolis]. *Science and Technology in Transport*, no. 1, pp. 30–38. (In Russian)
49. *Baranov L. A. & Balakina E. P.* (2020) *Metody povysheniya bezopasnosti dvizheniya poyezdov gorodskikh zheleznnykh dorog v usloviyakh tsentralizovannogo avtomaticheskogo uprav-*

- leniya [Methods for improving the traffic safety of urban railways in the context of centralized automatic control]. *Materialy XXVIII mezhdunarodnoy konferentsii "Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem"* [Proceedings of the XXVIII International Conference «Problems of Security Management of Complex Systems»]. Under the general editorship of A. O. Kalashnikov, V. V. Kulba, pp. 297–302. (In Russian)
50. *Baranov L. A.* (2020) The disturbances prediction in the systems of automatic train traffic control of urban transport systems/L. A. Baranov, E. P. Balakina, A. I. Godyaev//International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon., pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271390.
 51. *Baranov L. A. & Ikonnikov S. E.* (2019) *Bespilotnyye transportnyye sredstva gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta: upravleniye i obespecheniye bezopasnosti dvizheniya* [Unmanned vehicles of urban railway transport: Management and traffic safety]. *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nyye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti"* [Collection of scientific articles of the National Scientific and Practical Conference «Current Problems of Technosphere Safety»], pp. 39–41. (In Russian)
 52. *Baranov L. A.* (2019) *Bespilotnaya sistema upravleniya dvizheniyem poyezdov kak sostavlyayushchaya tsifrovizatsii gorodskogo transporta* [Unmanned train control system as a component of urban transport digitalization]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 5, no. 4, pp. 441–449. (In Russian)
 53. *Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. & Loginova L. N.* (2021) *Integratsionnyy podkhod v obuchenii operativnykh rabotnikov gorodskikh rel'sovykh transportnykh sistem* [An integration approach in the training of operational workers of urban railway transport systems] *Science and Technology in Transport*, no. 2, pp. 22–31. (In Russian)
 54. *Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. & Loginova L. N.* (2021) *Intellectual'noye tsentralizovannoye upravleniye dvizheniyem vneulichnogo gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh intensivnogo dvizheniya* [Intelligent centralized traffic control of heavy-traffic off-street urban railway transport. *Nadyozhnost' [Reliability]*, vol. 21, no. 2, pp. 17–23. (In Russian)
 55. *Kompleks gradostroitel'noy politiki i stroitel'stva goroda Moskvy* [Urban Planning Policy and Construction Complex of the City of Moscow]. [Electronic resource]: Golyanovo URL: <https://stroimsk.ru/metro/station/97> (Accessed: July 06, 2021).
 56. *Staryye karty gorodov Rossii i zarubezh'ya* [Old maps of cities in Russia and abroad]. [Electronic resource]: *Kak izmenyalis' granitsy Moskvy* [The way the borders of Moscow changed] URL: <http://retromap.ru/forum/viewtopic.php?p=255> (Accessed: July 06, 2021).
 57. *Minaev G. I., Sukhov S. B., Fyodorov A. G., Fursayev M. V. & Mizgiriyev S. N.* (2003) *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii metropolitenov RF* [Rules for the technical operation of the subways in the Russian Federation]. Moscow, ZAO Izdatel'skiy tsentr TA Inzhiniring (Publishing Center), 109 p. (In Russian)
 58. *Sauder R. L.* (1983) *Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization*/R. L. Sauder, W. M. Westerman//*Interfaces*, vol. 6, no. 13, pp. 24–37. (In Russian)
 59. *Drobyshev Yu. A.* (2021) *Olimpiady po matematike* [Olympiads in Mathematics]. Moscow, Ekzamen Publ., 144 p. ISBN 5–377–15817–2.
 60. *Mezhokh A. K.* (1977) *Voprosy analiza realizuyemosti zadannogo grafika dvizheniya poyezdov metropolitena* [Analysis of the feasibility of a set subway train schedule]. *Proceedings of MIIT*, iss. 550, pp. 54–57. (In Russian)
 61. *Safronov A. I.* (2011) *Usloviya realizatsii i realizuyemosti pri avtomatizirovannom postroyenii planovogo grafika dvizheniya passazhirskikh poyezdov metropolitena* [Conditions for imple-

- mentation and feasibility of automated passenger subway train traffic scheduling]. Nedelya nauki-2011. Nauka transportu: trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Science Week 2011. Science for Transport: Proceedings of the Scientific and Practical Conference]. Moscow, MIIT, p. III–157–III–158. (In Russian)
62. *Safronov A. I. & Sidorenko V. G.* (2012) Stsenarnoye prostranstvo postroyeniya planovogo grafika dvizheniya poyezdov metropolitena [Scenarios of automated subway train traffic scheduling]. Science and Technology in Transport, no. 1, pp. 51–56. (In Russian)
63. *D’Acerno L.* (2018) Defining Reserve Times for Metro Systems: An Analytical Approach/L. D’Acerno, M. Botte, M. Gallo, B. Montella//Journal of Advanced Transportation, pp. 1–15. DOI: 10.1155/2018/5983250.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором А. Б. Никитиным*

Поступила в редакцию 09.07.2021, принята к публикации 19.07.2021

САФРОНОВ Антон Игоревич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ)
safronov-ai@mail.ru

ЛЫСЕНКО Екатерина Владимировна — специалист подразделения «Управление талантами» Российского университета транспорта (МИИТ)
e.lisenko@rut.digital

© Сафронов А. И., Лысенко Е. В., 2021